

## استفاده از مواد هوشمند جهت تحلیل دینامیکی حرکات بازیکنان والیبال در حین پرش

محسن ابدالبیگی<sup>۱\*</sup>، طیبه زینی وند<sup>۲</sup>، فرشید هاشمی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد دره شهر، دانشجوی دکترا دانشگاه علم و صنعت

۲- دبیر آموزش و پرورش شهرستان دره شهر

۳- کارشناس ارشد تربیت بدنی، دبیر آموزش و پرورش شهرستان دره شهر

### چکیده

در این مقاله با استفاده از المان‌های پیزوالکتریک به عنوان یک ماده هوشمند به استخراج شتاب وارده بر بازیکن والیبال در حین پرش یا به عبارتی دیگر در حین حرکت اسپیک (spike)، به ویژه شتاب وارد بر مرکز ثقل بازیکن پرداخته شده است. برای این کار از یک سری مواد هوشمند به نام سرامیک‌های پیزوالکتریک استفاده شده که به شکل دیافراگم‌های دایره ای شکل بوده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ضمناً بدن بازیکن به صورت چند جزء به هم پیوسته مدل شده و همچنین با استفاده از ویژگی هوشمندی مواد پیزوالکتریک و معادلات حاکم بر آن‌ها و با استفاده از روابط حاکم بر بدن بازیکن، سرعت، شتاب و شتاب زاویه ای هر عضو محاسبه شده و در نهایت این پارامترها، برای مرکز جرم بدن نیز بررسی شده است. به طور کلی هدف مقاله ارائه شده استفاده از تکنولوژی مواد هوشمند در بررسی‌های فیزیولوژیکی بازیکنان رشته ورزشی والیبال می‌باشد که می‌تواند برای تحقیقات بیشتر در این زمینه جهت انجام کارهای جدید در حیطه این رشته، مانند ساخت ربات‌های والیبالیست، و یا ساخت وسایل مکمل تمرینی برای سطوح پیشرفته این رشته ورزشی به کار گرفته شود.

**کلمات کلیدی:** پیزوالکتریک، تحلیل دینامیکی، والیبال، پرش

## مقدمه

از آنجا که مکانیک علمی فراگیر در همه عرصه‌ها بوده و از طرفی انسان به عنوان یک مدل کاملاً پیشرفته و تقریباً دست نیافتنی که دارای مکانیزم‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی به صورت ذاتی می‌باشد لذا بررسی و مطالعه حرکات انسان و سیستم‌های حاکم بر آن می‌تواند برای علم مکانیک به عنوان مادر علوم حرکتی جالب باشد. از طرفی با توجه به وجود ورزش‌های مختلف که هر یک دارای حرکاتی خاص بوده و با پیشرفته شدن این ورزش‌ها به نظر می‌رسد که پرداخت علمی به حرکات ورزشی یکی از عرصه‌های باز تحقیقاتی برای علوم حرکتی می‌تواند باشد. در عین حال امروزه استفاده از مواد هوشمند در تکنولوژی‌های نو باعث پیدایش ایده‌های جدیدی در عرصه‌های مختلف مانند ورزش و تکنولوژی‌های کمک ورزشی شده است. در این بین مواد هوشمندی به نام مواد پیزوالکتریک توانسته است به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد هوشمند مورد توجه محققین گردد. یکی از ویژگی‌های مهم این مواد حساس بودن به نیرو و فشار است که در واکنش به آن، یک جریان الکتریکی ایجاد می‌کند. در این مقاله برای محاسبه نیروی وارد بر بدن یک بازیکن والیبال و نیز شتاب مرکز ثقل بازیکن در حین حرکت اسپک (بخش پرش از آن) از این مواد استفاده شده که می‌تواند در آینده منشاء ایده‌های جدیدتری در زمینه پیدایش تکنولوژی‌های کمک ورزشی و یا حتی ربات‌های ورزشی مانند ربات والیالیست باشد. لازم به ذکر است که طرح جزییات تحلیل رفتاری مواد هوشمند پیزوالکتریک در حالت استفاده شده در این مقاله نیازمند صفحات بیشتری می‌باشد که با توجه به محدودیت تعداد صفحات بطور خلاصه مطرح شده و جزییات آن به مراجع ارجاع داده شده است.

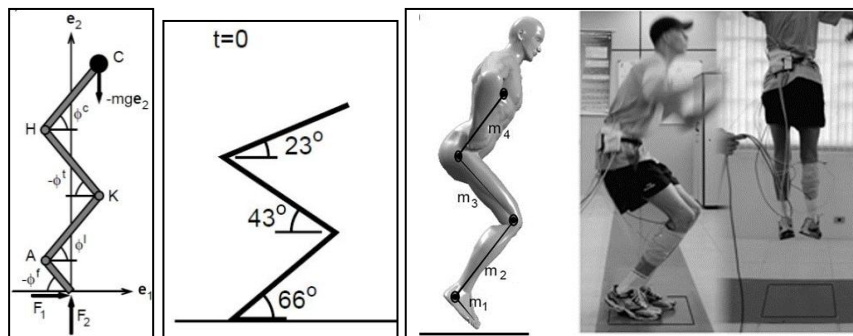
سابقه اینگونه تحلیل‌ها تا آنجا که مشاهده شده است، کم می‌باشد. برخی از تحقیقات نیز با رویکرد علم تربیت بدنی انجام شده است که معمولاً از داده‌های تجربی استفاده می‌نمایند.

## روش کار

برای انجام کار دو بخش جداگانه مطرح می‌شود. ابتدا اجزاء بدن مانند یک مکانیزم به هم پیوسته مدل شده و معادلات حاکم بر آن‌ها نشان داده می‌شود. سپس معادلات حاکم بر مواد پیزوالکتریک و به ویژه دیافراگم دایره ای مورد نظر بیان شده و در نهایت با ترکیب این دو سری از روابط، نتیجه نهایی استخراج خواهد شد.

## مدل مکانیکی بدن در حین پرش:

یک بازیکن والیبال باید در کسری از ثانیه، خود را به ارتفاع لازم برساند. بررسی‌های انجام شده از پرش بازیکنان توسط دوربین‌های فیلمبرداری نشان می‌دهد که کل زمان یک پرش قائم از لحظه استارت حرکت تا لحظه جدا شدن پنجه پا از زمین، حدود ۰/۳ ثانیه می‌باشد. در این مدت زمان تغییرات زوایای بین اجزای تحتانی بدن شامل (کف پا، ساق، ران و لگن) باعث بلند کردن قسمت فوقانی بدن که حدود ۷۰٪ وزن بدن را تشکیل می‌دهد، می‌شود [۱]. بررسی و تحلیل مکانیک این حرکت، با مدل کردن بدن انسان به صورت چهار جزء به هم متصل، انجام شده است که شامل کف پا، ساق، ران و بالا تنه که به عنوان یک عضو در نظر گرفته شده، می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: مدلسازی بدن در حین پرش

از طرفی برای بررسی و تحلیل سرعت‌ها و شتاب‌ها، زاویه هر یک از اجزا با سطح افق را با پارامترهای  $\phi_f$  (زاویه کف پا با سطح افق)،  $\phi_l$  (زاویه ساق پا با سطح افق)،  $\phi_t$  (زاویه ران پا با سطح افق) و  $\phi_c$  (زاویه رابط بین لگن و مرکز جرم بدن، بالاتنه) نشان داده می‌شود. نکته مهم اینکه با توجه به وجود ۷۰٪ وزن بدن در بالاتنه، لذا مرکز جرم بدن نیز در بالاتنه قرار دارد که در شکل (۱) نشان داده شده است. در استفاده از زوایا فرض بر این است که زاویه‌هایی که به صورت ساعتگرد ایجاد شده‌اند را مثبت و بقیه، منفی در نظر گرفته شده است.

برای ادامه تحلیل، لحظه ای که شخص به صورت کاملاً منقبض شده به پایین آمده و آماده شروع پرش است به عنوان لحظه  $t=0$  در نظر گرفته شده است (شکل ۱). زوایای تعریف شده در این لحظه اندازه گیری شده که برابر مقادیر زیر می‌باشند [۱].

$$\phi_c = 23^\circ \quad \phi_l = 66^\circ \quad \phi_t = -43^\circ \quad \phi_f = 0$$

که نشان می‌دهد در این لحظه کف پای بازیکن کاملاً منطبق بر سطح زمین می‌باشد، زانوها کاملاً خم شده و قسمت فوقانی بدن به سمت جلو خم شده است. در یک مدل نمونه برای ادامه تحلیل‌ها طول هر عضو به صورت نمونه زیر در نظر گرفته می‌شود: محققان با استفاده از نظریه دینامیک معکوس، دوربین فیلمبرداری و محاسبات رایانه ای توانسته‌اند زوایای تعریف شده در بدن را به صورت توابعی از زمان تعریف کنند که در همه این روابط زمان بر حسب ثانیه و زوایا بر حسب رادیان می‌باشند؛ [۱]

$$\phi_f = -2t \quad (1)$$

$$\phi_l = 20(t - 0.15)^2 + 0.7 \quad (2)$$

$$\phi_t = -15(t - 0.1)^2 - 0.6 \quad (3)$$

$$\phi_c = 2.5t + 0.4 \quad (4)$$

$$l_f = 27 \text{ cm (Foot)} \quad l_l = 48 \text{ cm (Angle to Knee)}$$

$$l_t = 50 \text{ cm (Hip to Center of mass)} \quad W = 68 \text{ kg}$$

### سرعت زاویه ای اجزاء بدن:

همانطور که می‌دانیم سرعت زاویه ای از رابطه  $\omega = \frac{d\phi}{dt}$  بدست می‌آید و می‌توان سرعت زاویه ای هر عضو را به صورت زیر بدست آورد:

$$\vec{\omega}_f = \left( \frac{d\phi_f}{dt} \right) \hat{e}_3 = -2 \hat{e}_3 \quad (5)$$

$$\vec{\omega}_l = \left(\frac{d\phi_l}{dt}\right) \hat{e}_3 = 40(t - 0.15) \hat{e}_3 \quad (6)$$

$$\vec{\omega}_t = \left(\frac{d\phi_t}{dt}\right) \hat{e}_3 = -30(t - 0.1) \hat{e}_3 \quad (7)$$

$$\vec{\omega}_c = \left(\frac{d\phi_c}{dt}\right) \hat{e}_3 = 2.5 \hat{e}_3 \quad (8)$$

### سرعت هر مفصل:

برای بدست آوردن سرعت در هر نقطه نیز از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\vec{v}_q = \vec{v}_p + \frac{d\vec{r}_{q/p}}{dt} = \vec{v}_p + \vec{\omega} \times \vec{r}_{q/p} \quad (9)$$

که در نتیجه آن مقادیر سرعت  $\vec{v}_a, \vec{v}_k, \vec{v}_H$  و  $\vec{v}_C$  بدست می آیند که در آن سرعت مرکز جرم بدن می باشد. می توان به این نکته اشاره کرد که اگر نمونه های عددی در روابط بالا جایگذاری شود، مشاهده می شود که مؤلفه قائم سرعت نقاط به صورت مرتب از پایین به بالا (کف پا به سمت بالا) بیشتر شده است، یعنی

$$(\vec{v}_A)_{e_2} < (\vec{v}_k)_{e_2} < (\vec{v}_H)_{e_2} < (\vec{v}_C)_{e_2} \quad (10)$$

### سرعت تغییر زوایای بین اجزاء بدن:

با توجه به تعریف حرکت نسبی در دینامیک، می توان سرعت نسبی بین هر دو عضو بدن را نیز بدست آورد. برای این کار با فرض اینکه سه جسم  $B1, B2, B3$  به صورت سری و متصل به هم باشند که در روی زمین ( $\vec{E}$ ) قرار دارند، می توان نشان داد که:

$$\omega_{B3/E} = \omega_{B3/B2} + \omega_{B2/B1} + \omega_{B1/E} \quad (11)$$

بنابراین می توان از روابط زیر برای محاسبه سرعت های نسبی اعضای بدن نسبت به هم استفاده نمود:

$$\omega_{t/l} = \omega_t - \omega_l \quad \& \quad \omega_{c/t} = \omega_c - \omega_t \quad \& \quad \omega_{l/f} = \omega_l - \omega_f \quad (12)$$

### شتاب زاویه ای و شتاب کل برای هر نقطه:

از دینامیک، شتاب هر نقطه از یک جسم را می توان با مشتق گیری از معادله سرعت آن به صورت زیر بدست آورد:

$$\vec{a}_q = \vec{a}_p + \left(\vec{\alpha} \times \vec{r}_{q/p}\right) + \vec{\omega} \times \left(\vec{\omega} \times \vec{r}_{q/p}\right) \quad (13)$$

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2} \vec{e}_3 \quad (14)$$

که البته با ساده سازی در حرکت دو بعدی می توان ترم سوم از رابطه (۱۳) را به صورت زیر نشان داد:

$$\vec{\omega} \times \left(\vec{\omega} \times \vec{r}_{q/p}\right) = -\omega^2 \vec{r}_{q/p}$$

و برای مثال شتاب مفصل A به صورت زیر قابل محاسبه است:

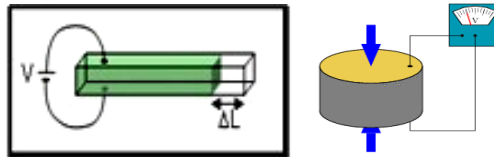
$$\vec{a}_A = \vec{a}_O + (\vec{\alpha} \times \vec{r}_{A/O}) + \vec{\omega}_f \times (\vec{\omega}_f \times \vec{r}_{A/O}) \quad (15)$$

### نیروهای وارد بر بدن از طرف زمین:

بر طبق قانون دوم نیوتن، با داشتن شتاب نقاط مختلف می توان به نیروهای وارد بر هر یک از آنها نیز دست یافت و بالعکس. از طرفی بر اساس قوانین حرکت، نیروی وارد بر یک جسم به طور کلی بر مرکز جرم آن جسم وارد می شود. می توان مشاهده نمود که اگر نیروی وارد بر بازیکن از طرف زمین در هر لحظه از حرکت مشخص باشد با استفاده از روابط بدست آمده برای شتاب نقاط مختلف، می توان مقدار شتاب مرکز جرم بازیکن و حتی شتاب نقاط دیگر از بدن را محاسبه نمود. در اینجا برای محاسبه نیروی وارد بر بازیکن از طرف زمین، از مواد هوشمند پیزوالکتریک استفاده شده است.

### مواد پیزوالکتریک:

بطور کلی پیزوالکتریک به موادی گفته می شود که اگر تحت تأثیر فشار یا نیرو قرار بگیرند، در سطوح خارجی آنها بار الکتریکی تولید شده (اثر مستقیم پیزوالکتریک) و اگر در یک میدان الکتریکی قرار بگیرند، دچار تغییر شکل می شوند (اثر معکوس پیزوالکتریک) (شکل ۲). حالت مورد نظر در این مقاله همان اثر مستقیم این مواد می باشد. از طرفی امروزه با اندازه گیری مقدار بار الکتریکی ایجاد شده در اثر فشار وارده، می توان به نتایج بسیار مهمی درباره میزان تغییر شکل (خیز) و مقدار نیروی وارد شده بر آنها دست یافت. آنچه در این مقاله مورد نظر است نیز استفاده از این ویژگی مواد پیزوالکتریک می باشد. یعنی اگر المانهای پیزوالکتریک به گونه ای در سطح زیر پای بازیکن در حال پرش تعبیه شود که همه نیروی وارد بر زمین به این المانها وارد شود، می توان با اندازه گیری جریان الکتریکی ایجاد شده، به مقدار نیروی وارده بر این المانها که همان نیروی وارد بر زمین و البته همان نیروی وارد بر بدن بازیکن (عمل و عکس العمل) است نیز دست یافت.



شکل ۲- اثر مستقیم و معکوس پیزوالکتریک

### معادلات حاکم بر مواد پیزوالکتریک:

روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک بر اساس استانداردهای مربوطه به صورت زیر می باشند: [۲]

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad \& \quad D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S E_k$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad \& \quad D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (16)$$

از طرفی با توجه به اینکه در مواد پیزوالکتریک خواص دی الکتریک و الاستیک به صورت همزمان وجود دارند، با اعمال قانون اول ترمودینامیک در یک ماده پیزوالکتریک الاستیک در حالت کلی می توان اثبات نمود که [۲]:

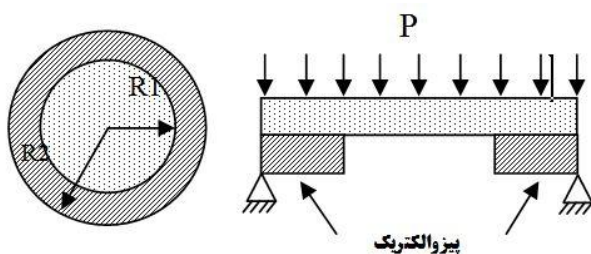
$$dU = \theta d\Sigma + T_{ij} dS_{ij} + E_i dD_i \quad (17)$$

که در آن  $U$  چگالی انرژی داخلی،  $\theta$  دما،  $\Sigma$  چگالی آنتروپی،  $T_{ij}$  تنش مکانیکی،  $S_{ij}$  کرنش ناشی از تنش مکانیکی،  $E_i$  میدان الکتریکی خارجی و  $D_i$  جابجایی الکتریکی می‌باشد.

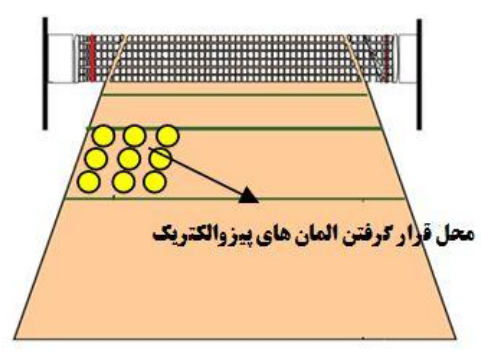
با استفاده از روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک و نیز استفاده از تئوری‌های الاستیسیته و پوسته‌ها و ورق‌ها که شرح آن در این مقاله میسر نیست می‌توان به آنالیز رفتار مواد پیزوالکتریک دست یافت [۳]. امروزه مبحث برداشت انرژی الکتریکی از این مواد در اثر نیروهای خارجی یکی از جالب‌ترین موضوعات مورد نظر محققان می‌باشد [۴، ۵]. در این مقاله با برداشت انرژی الکتریکی ایجاد شده در اثر نیروی وارده بر سطح زیر پای بازیکن، و استفاده همزمان از روابط حاکم بر اعضای بدن که در بالا تشریح شد می‌توان به محاسبه نیروی وارد بر بازیکن از طرف سطح زیر پای وی و نیز شتاب ایجاد شده در بازیکن دست یافت.

### دیفراگم دایره ای پیزوالکتریک:

برای استفاده از المان‌های پیزوالکتریک به عنوان سنسورهای فشار و نیرو از حالت‌های مختلفی استفاده می‌شود که یکی از پر کاربردترین آن‌ها، دیفراگم‌های دایره ای می‌باشد [۶، ۷، ۸]. دیفراگم مورد نظر در این مقاله به صورت شکل (۳) می‌باشد که دارای بازدهی و دقت بالایی در نشان دادن میزان بار الکتریکی و در نتیجه اندازه گیری نیروی وارد بر آن می‌باشد. تحلیل رفتاری این دیفراگم‌ها و برداشت انرژی الکتریکی از آن‌ها در تحقیقات فراوانی مورد بررسی قرار گرفته است [۹، ۱۰]. در این شکل المان پیزوالکتریک به صورت یک سطح حلقوی به شعاع داخلی و خارجی  $R_1$  و  $R_2$  است که به یک سطح دایره ای فلزی دلخواه با شعاع  $R_2$  چسبیده است. و کل مجموعه توسط یک تکیه گاه ساده، ثابت می‌شود. ابعاد این دیفراگم‌ها در حد میلی متر بوده و معمولاً در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با فرض اینکه سطح زیر پای بازیکن مجهز به این دیفراگم‌ها باشد (شکل ۴)، نیروی وارد بر این سطح ( $P$ ) باعث ایجاد تغییر شکل (خیز) در سیستم می‌شود.



شکل ۳- دیفراگم مورد نظر در این مقاله



شکل ۴- سطح زیر پای بازیکن مجهز به دیفراگم

این تغییر شکل باعث ایجاد بارهای الکتریکی روی سطوح اطراف المان پیزوالکتریک می‌شود. با تشکیل یک مدار الکتریکی ساده شامل دو سیم متصل به دو سر حلقه پیزوالکتریک و یک ولت سنج می‌توان میزان ولتاژ ایجاد شده در هر بار پرش را ثبت نمود. از طرفی با استفاده از تئوری پوسته و ورق و معادلات حاکم بر خیز صفحات و نیز روابط حاکم بر انرژی کرنشی تولید شده در پوسته‌ها و ورق‌ها و نیز مواد پیزوالکتریک، می‌توان به مقادیر نیروی وارده بر سطح دیفراگم پیزوالکتریک دست یافت

که همان نیروی وارد بر بازیکن از طرف زمین نیز می‌باشد [۱۱]. بر اساس تئوری پوسته و ورق می‌توان رابطه دیفرانسیلی خیز ایجاد شده در صفحات متقارن تحت بار گسترده را با در نظر گرفتن سیستم مختصات قطبی به صورت زیر بیان کرد [۳]:

$$\nabla^4 w_r = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left( \frac{d^2 w_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw_r}{dr} \right) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw_r}{dr} \right) \right) \right) = \frac{p}{D} \quad (18)$$

که در آن‌ها  $w_r$  خیز ناشی از بار گسترده  $P$  در هر نقطه از صفحه بوده،  $r$  مختصات شعاعی و  $D$  سختی صفحه می‌باشد. با حل معادله دیفرانسیل موجود در رابطه ۱۸ می‌توان گفت؛

$$w = A + B \ln r + Cr^2 + Er^2 \ln r + \frac{pr^4}{64D} \quad (19)$$

با استفاده از این رابطه و نیز روابط حاکم بر مواد پیزوالکتریک (که به دلیل محدودیت صفحات نمی‌توان در اینجا مطرح نمود) می‌توان به مقادیر انرژی‌های ایجاد شده و به دنبال آن مقادیر نیروی ایجاد شده دست یافت [۱۱]. در نهایت با داشتن مقادیر نیرو و استفاده از روابط حاکم بر اعضای بدن می‌توان مقادیر شتاب نقاط مختلف بدن مانند مرکز ثقل را بدست آورد.

### بحث و نتیجه گیری

بر اساس آنچه گفته شد می‌توان به سیستمی برای محاسبه نیروی وارده از طرف زمین بر بازیکن در حین پرش و نیز شتاب ایجاد شده در نقاط مختلف بدن دست یافت که محققین را برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر در تحلیل‌های خود کمک خواهد کرد. علاوه بر آن می‌توان با استفاده از المان‌های پیزوالکتریک به ایده‌های جدید دیگری برای رسیدن به تحلیل‌های دقیق‌تر در مطالعه رفتار بدن بازیکنان در رشته‌های مختلف ورزشی دست یافت. بطور کلی می‌توان به این نتیجه نیز اشاره نمود که با پیشرفت علم مکانیک و استفاده روزافزون از مواد هوشمند در اندازه‌گیری‌ها و از طرفی حرکت رشته‌های ورزشی به سمت تمرینات هدفمند و دقیق علمی، می‌توان با ترکیب یافته‌های علمی در رشته مکانیک با نیازهای رشته‌های ورزشی مختلف به نتایج بسیار مطلوب و دقیق در علوم ورزشی رسید.

جستجوهای انجام شده در مقالات مختلف [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷] و سایت‌های معتبر علمی، نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات مشابه با رویکرد تجربی و از دیدگاه علوم ورزشی به صورت خاص انجام شده و کمتر از دیدگاه بین رشته‌ای استفاده شده است و لذا می‌توان سرآغازی برای ادامه این مسیر بویژه در استفاده از مواد هوشمند در ورزش و پژوهش‌های کامل‌تر و دقیق‌تر با طرح کامل جزییات تحلیلی در آینده باشد.

### پیشنهادات:

آنچه در این مقاله مطرح شد نشان می‌دهد که موارد بسیار زیادی برای استفاده از مواد هوشمند بخصوص مواد پیزوالکتریک (به عنوان یکی از پر کاربردترین آن‌ها) در علوم ورزشی وجود دارد که نیازمند بررسی و تحلیل پژوهشگران بویژه محققین بین رشته‌ای (مکانیک و علوم ورزشی) می‌باشد.

از جمله موضوعاتی که می‌توان به عنوان ادامه این مقاله دنبال نمود، استفاده از المان‌های پیزوالکتریک برای کمک به داوران رشته‌های ورزشی مانند والیبال می‌باشد که با تعبیه آن‌ها در خطوط زمین می‌توان از اشتباهات داوری تا حدود بسیار زیادی جلوگیری کرد. علاوه بر آن بررسی و تحلیل میزان ضربه وارده به توپ‌ها با استفاده از مواد پیزوالکتریک در حالت پوسته‌ای می‌باشد که این نیز می‌تواند یکی از پیشرفته‌ترین تحقیقات بین رشته‌ای باشد.

### منابع

- [1]. A.Tözeren, Human Body Dynamics Classical Mechanics and Human Movement, Springer-Verlag New York, 2000.
- [2]. IEEE standard 176, IEEE Standards on Piezoelectricity, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, USA, 1978.
- [3]. Nellya N.Rogacheva, the theory of piezoelectric shells and plates,CRC Press,1994
- [4]. H S Kim, J Kim and J Kim, "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration", International journal of precision engineering and manufacturing vol.12, No. 6, pp.1129-1141, 2011.
- [5]. Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G. H., "A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials," The Shock and Vibration Digest, Vol. 36, No. 3, pp. 197-205, 2004.
- [6]. C.Mo, L. J. Radziemski, and W.W. Clark, "Analysis of piezoelectric circular diaphragm energy harvesters for use in a pressure fluctuating system," Smart Materials and Structures, vol. 19, no. 2, Article ID 025016, 2010.
- [7]. S. Kim, W. W. Clark, and Q. M. Wang, "Piezoelectric energy harvesting using a biomorph circular plate: experimental study," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 16, no. 10, pp. 855–864, 2005.
- [8]. S. Kim, W. W. Clark, and Q. Wang, "Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: analysis," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 16, no. 10, pp. 847–854, 2005.
- [9]. S. Mohammadi and M. Abdalbeigi, "Analytical Optimization of Piezoelectric Circular Diaphragm Generator", Advances in Materials Science and Engineering Volume 2013, Article ID 620231, 10 pages, 2013.
- [10]. M.Abdalbeigi and S.Mohammadi, "Analysis of Physical Parameters Effect in Generated Energy By Piezoelectric Micro Generator," Trends in advanced science and engineering, TASE 5(1) 17-26, 2012.
- [11]. ابدالیگی. م، ۱۳۹۱، "آنالیز سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پیزوالکتریکی جهت برداشت انرژی ارتعاشی محیط"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز.
- [12]. K. Roemer, C. Kuhlmann, T.L. Milani, "body angles in volleyball spike investigated by modelling methods", XXV ISBS Symposium, Ouro Preto – Brazil, 2007.
- [13]. A. Seyfarth, A. Friedrichs, V. Wank, R. Blickhan, "Dynamics of the long jump", Journal of Biomechanics 32, 1259-1267, 1999.
- [14]. C. Kuhlmann, K.Roemer, Thomas L. Milani, "Aspects of a three dimensional motion analysis of the volleyball spike in high level competition", XXV ISBS Symposium, Ouro Preto – Brazil, 2007.
- [15]. Ying-Cheng Chen and Chen-fu Huang, "Kinematical analysis of female volleyball spike", Proceedings of XXVI International Conference on Biomechanics in Sports (pp.617-620). Korea: Seoul, 2008.
- [16]. Linnell, W.; Wu, T.; Baudin, P.; Gervais, P, "analysis of the volleyball spike using working model 2d", JOURNAL OF BIOMECHANICS; 40; S760, 2007.
- [17]. M Tokuyama, et all, "Individuality and reproducibility in high-speed motion of volleyball spike jumps by phase-matching and averaging", Journal of Biomechanics 38, 2050–2057, 2005